

SM570 鋼による Y 型橋脚の耐震安全性の 3 次元照査

JFE エンジニアリング（元名工大大学院）正会員 ○水野 雅之 ・ 名工大 フェロー会員 後藤 芳顕

名工大 正会員 海老澤 健正 ・ 豊田工専 正会員 川西 直樹 ・ 名高速 正会員 大門 大

1. まえがき：近年，想定された巨大地震動の多方向成分に対して，既設構造の安全性を照査し，耐震補強の有無を判断する必要性が生じている．かかる照査では，応答値や限界値の評価において，多方向地震動成分同時入力下の構造物の 3 次元挙動を適切に考慮する必要がある．2018 年制定の土木学会，鋼・合成構造標準示方書，耐震設計編¹では，上記のような場合に適用可能な 3 次元照査法が提示されている．ここでは，この方法に従い，都市内連続高架橋における SM570 材を用いた Y 型無充填鋼製橋脚ならびにコンクリートを充填した Y 型 CFT 橋脚の耐震安全性について照査した結果を報告する．現状では SM570 材の橋脚の塑性化は許容されないが²⁾，CFT 化で耐震補強する場合，鋼部材に何らかの塑性化は避けられない．そこで，照査に先立ち，SM570 素材や橋脚模型に対する繰り返し載荷実験で，橋脚の終局挙動特性や数値モデルの検討を行った．

2. 照査対象の Y 型橋脚と高架橋：上下線分離型の連続高架橋内の SM570 材による Y 型橋脚 5（図 1）を対象とする．照査に用いる高架橋の振動単位としては，橋脚 5 を含む図 2 の橋脚 1~10 の橋脚 10 基で支持された 9 径間とした．高架橋の対象区間では SM570 材の橋脚は橋脚 5 の他，橋脚 2，橋脚 8 がある．他はすべて SM490Y 材の橋脚である．無充填の鋼製橋脚には車両衝突防止のため，いずれも，橋脚の下ベースプレートから 1 パネル範囲（1.6m）まで，コンクリートが充填されている．一方，SM570 材の無充填鋼製橋脚を CFT 化する場合

Y 脚分岐部までコンクリートを充填する．

3. 多方向地震動成分に対する橋脚の 3 次元照査法：橋脚 i の耐震安全性は，多方向地震動下において橋脚に作用する最大地震力（応答値 S ）と橋脚の最大耐力（限界値 R ）を算定し， $R \geq S$ で照査する．

最大地震力 S は次のように算定する．まず，2. で述べた高架橋の振動単位をはり要素で表した 3 次元モデルに対して多方向地震動下の複合非線形時刻歴応答解析を実施する．そして，地震時に橋脚 i が最も安全限界に近づいた厳しい状態において，橋脚 i に作用する内力ベクトルから死荷重による内力ベクトル $\{\mathbf{f}_d^i\}$ を除いた最大地震力ベクトル $\{\mathbf{f}_m^i\}$ を求める．橋脚 i に作用する最大地震力 S は $S = f_m^i = \sqrt{(\mathbf{f}_m^i)^T (\mathbf{f}_m^i)}$ となる．

限界値 R は次のように算定する．橋脚に作用する最大地震力モードベクトル $\{\hat{\mathbf{f}}_m^i\} = \{\mathbf{f}_m^i\} / f_m^i$ （単位ベクトル）をもとに橋脚の最大耐力算定用の作用力ベクトル $f^i \{\hat{\mathbf{f}}_m^i\}$ （ f^i ：荷重倍率）を定義する．そして，死荷重による内力ベクトル $\{\mathbf{f}_d^i\}$ 作用下で， f^i を制御変数として，橋脚の Pushover 解析を行った時の最大耐力 f_u^{ip} と振幅漸増型の繰り返し解析を行ったときの最大耐力 f_u^i のうち小さい方を橋脚 i の最大耐力 R とする．すなわち $R = \min(f_u^{ip}, f_u^i)$ ．

4. 応答値の算定：橋脚 1~10 間の連続高架橋をモデル化し，複合非線形時刻歴応答解析を実施した．橋脚，桁はすべてはり要素でモデル化した．損傷を許容する橋脚には，構成則として，鋼部材にはバイリニア移動硬化則

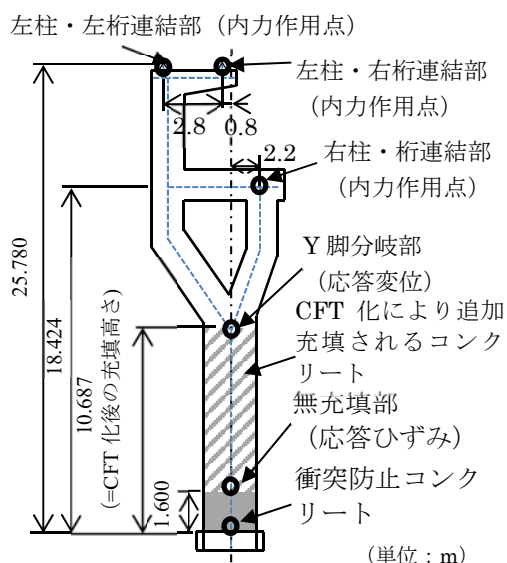


図 1 SM570 材による Y 型橋脚 5

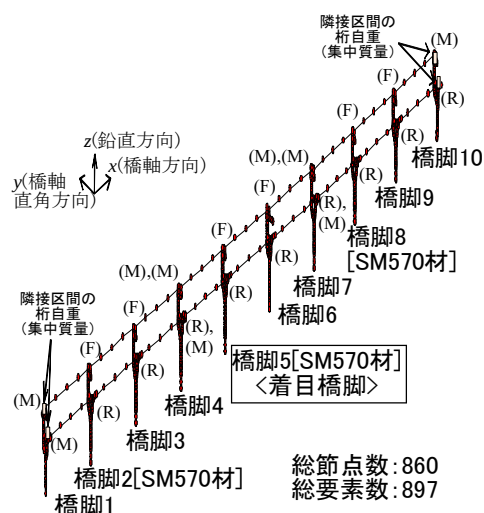


図 2 検討対象区間の立体骨組モデル

キーワード SM570, コンクリート充填橋脚, Y 型橋脚, FE 解析, 耐震照査
連絡先 〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学 TEL052-735-5021 FAX052-735-5563

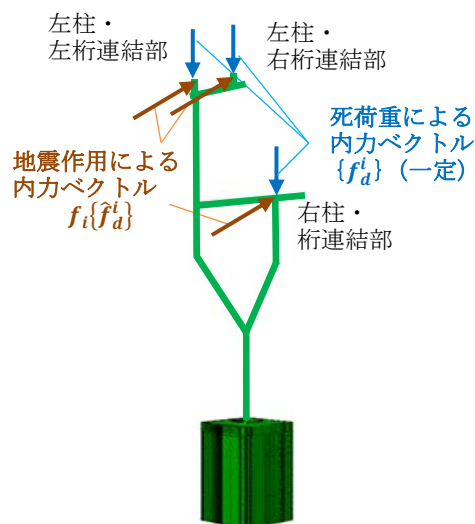


図3 解析モデルと作用荷重

(2次勾配 $E/100$), また, 充填コンクリートには2次関数の新技術報告書モデルを用いた. 上下線の鋼桁は弾性とした. 桁の質量については, 密度から算出された質量を各要素節点に均等配分した集中質量とした. 端部の橋脚1, 橋脚10には振動単位外側の隣接区間の桁質量の1/2をそれぞれの橋脚上に集中質量として考慮した. 橋脚の基礎への固定は集約線形ばね (SRモデル) で表した. なお, SM570材の橋脚は無充填の場合とCFT化した場合の2種類を検討するので, 応答値の算定は2種類の高架橋に対して行った. 地震動はJRT観測波のNS, EW, UDの3成分を同時入力した.

5. 橋脚の限界値算定: 照査対象とするY型橋脚5は解析ソフトABAQUSを用いることを前提に図3のようにモデル化した. 鋼部材は局部座屈や履歴挙動が適切に表現できるように構成則に三曲面モデル³⁾を導入した厚肉シェル要素 (S4R) で表した. 材料パラメータはSM570の降伏応力, 引張り強度は規格値下限を, 他は一軸引張試験・繰返し載荷実験で同定した値を用いた. 橋脚の充填コンクリートは拘束効果を考慮できる損傷塑性モデルを構成則に導入したソリッド要素 (C3D8R) で表した. 損傷塑性モデルには過去の実験で同定した値を用いた. 充填コンクリートの圧縮強度は車両衝突防止用コンクリートと同一の強度13.5MPaとした. なお, 局部座屈が生じない橋脚部分は, はり要素 (B31) でモデル化した.

鋼パネルと充填コンクリートの界面にはコンタクトペアを用いた. ただ, 数値解析の収束性から, ダイヤフラム, 縦リブとコンクリートの界面は接触ばね要素, コンクリートのひび割れ面は接触ばね要素に加え, セン断ばね要素で表現した⁴⁾. なお, 鋼部材と充填コンクリート界面の初期間隙は過去の実績から決定した.

以上の方法によりY型橋脚5は無充填橋脚とCFT橋脚の2種類のモデルを作成する. そして, 4.の時刻歴応答解析で同定されたそれぞれの橋脚モデルにとって最

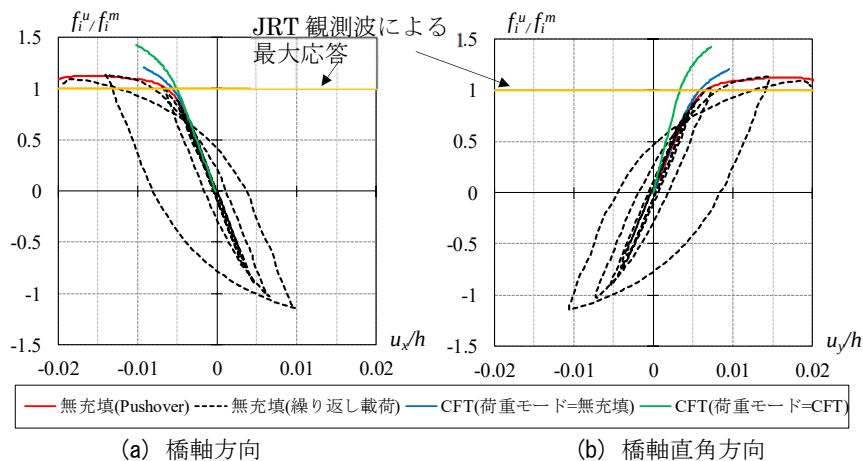


図4 荷重倍率と変位を鉛直高さで除した関係

表1 各鋼製橋脚モデルの最大耐力

解析モデル	無充填橋脚		CFT 橋脚	
載荷方法	Pushover	繰返し	Pushover	Pushover
荷重モード	無充填橋脚	無充填橋脚	無充填橋脚	CFT 橋脚
f_u^i/f_m^i	1.13	1.13	1.20 以上	1.42 以上
u_u^i/h	橋軸方向	橋軸方向	橋軸方向	橋軸方向
	-0.0161	-0.0140	-0.0093>	-0.0101>
	橋直方向	橋直方向	橋直方向	橋直方向
	0.0167	0.0145	-0.0096>	0.0073<

も厳しい荷重モード $\{f_m^i\}$ (3.参照) を用いて Pushover 解析と繰返し解析を実施して最大耐力を算定し, 小さい方を限界値とする.

6. 照査の結果: SM570材のY型無充填鋼製橋脚モデルとY型CFT橋脚モデルの2種類について5.で述べた限界値を求めるためのPushover解析と繰返し解析を実施した. 荷重倍率 f^i/f_m^i とY脚分岐部 (高さ $h=10.687\text{m}$) での橋軸方向と橋軸直角方向の変位成分 $(u_x/h, u_y/h)$ の関係を図4に示す. ここで, CFT橋脚に対するPushover解析の結果には, 荷重モードに無充填橋脚のモードを用いた場合も記入している. 図4で橋脚の応答が $f^i/f_m^i \geq 1$ となると安全と判断される.

CFT橋脚のPushover解析では, 解析の収束性が悪く, 厳密な意味での最大耐力は得られなかった. 最大耐力>解析最終値と判断した. また, CFT橋脚ではPushover解析による耐力が十分大きいので, Pushover解析の結果のみ示した. 表1に図4の最大耐力 f_u^i/f_m^i とその時の変位 u_u^i/h の値を示す.

表1からSM570材の無充填橋脚モデルでは最大耐力は最大地震力に対して10%程度の余裕である. このように, 余裕度が少ないことから, 無充填の場合, 最大耐力以降の荷重低下が極端に生じないことを確認する必要がある. 一方, CFT化すれば耐力は大幅に上昇し, 橋脚本体の安全性は十分なものになるが, 基礎への負担が増えるため, この影響について検討が必要である.

謝辞: 奥村徹氏 (九産大) には貴重な助言をいただきました.

参考文献: 1) 土木学会: 鋼・合成構造標準示方書 (耐震設計編), 2018. 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2012. 3) 後藤芳顕ら: 2方向繰返し載荷を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性, 土木学会論文集, No.780/I-70, 2005. 4) 後藤芳顕ら: 充填コンクリートとの相互作用を考慮した矩形断面鋼製橋脚の繰返し挙動のFEM解析, 土木学会論文集 A, Vol.66, 2010.